

УДК 621.363

Вибрационный модулятор для контроля напряженности электрических полей в орбитальных условиях эксплуатации

Р. Ю. Дорوفеев, Д. В. Козлов¹, И. П. Смирнов, А. А. Жуков²

¹к. т. н., ²д. т. н., проф.

АО «Российские космические системы»

e-mail: rdorof@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены результаты системных исследований особенностей функционирования и характеристик вибрационного модулятора электрических полей. В испытаниях получены результаты значений выходного сигнала модулятора при воздействии напряженности электрического поля в диапазоне 0 ~ 250 кВ/м. Определены следующие основные метрологические характеристики микросистемного вибрационного модулятора: чувствительность, инерционность, статическая характеристика. Модулятор классифицирован по способу получения выходного сигнала от входной величины, по характеру зависимости выходного сигнала от входного сигнала, типу действия, области применения. Определена возможность применения разработанного изделия для контроля электрических полей на КА в орбитальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: вибрационный модулятор электростатических полей, преобразователь, чувствительность, порог чувствительности, напряженность электрического поля, выходной сигнал, метрологические характеристики

Vibration Modulator for Electric Field Intensity Control in Orbital Conditions

R. Yu. Dorofeev, D. V. Kozlov¹, I. P. Smirnov, A. A. Zhukov²

¹candidate of engineering science, ²doctor of engineering science, professor,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: rdorof@yandex.ru

Abstract. The paper discusses the results of system research of the functioning peculiarities and characteristics of a vibration electric field modulator. Modulator output signal values in electric field with intensity in the range of 0 ~ 250 kV/m are obtained. The following main metrological characteristics of a microsystem vibration modulator are identified: sensitivity, sensitivity threshold, response time, and static pattern. The modulator is classified depending on the method for producing an output signal from the input value on the nature of dependency of the output signal on the input signal, type of action, and scope of use. In conclusion it is determined that it is possible to use the developed product for electric field control on the spacecraft in orbital conditions.

Keywords: vibrating electric field modulator, converter, sensitivity, sensitivity threshold, intensity of electric field, output signal, metrological characteristics

При эксплуатации отечественной ракетно-космической техники в последнее время наблюдается устойчивая тенденция, указывающая на уменьшение надежности спутников и снижение сроков их активного существования.

Основная причина отказа функционирования спутников нового поколения, выпускаемых российскими производителями, заключается в недостатках электронной компонентной базы (ЭКБ) космической техники, что выражается в ее невысоком качестве, несоответствии условиям космического применения и слабой защищенности от электростатических воздействий. При этом одним из важных факторов, действующих на КА в орбитальных условиях и отрицательно влияющих на надежность бортовой радиоаппаратуры (БРА), являются электростатические помехи [1].

Вместе с тем достаточно сложно осуществить эффективную защиту БРА от внешних воздействий, особенно от такого деструктивного влияния, как ионосферная плазма. Значения электрических потенциалов на поверхности КА достигают сотен вольт.

Одно из направлений решения проблемы защиты БРА от ЭСР — создание эффективной датчиковой аппаратуры для контроля электростатических полей, исполнительным элементом которой является вибрационный модулятор. Наиболее перспективные устройства в современной сенсорной технике — датчики вибрационного типа. АО «Российские космические системы» предложен вариант измерителя электрических полей по технологии микромеханики, соединивший в себе такие важные качества, как микроминиатюрность и вибрационный принцип работы.

Цель настоящей работы — визуализация возможности детектирования вибрационным модулятором электрических полей в диапазоне значений потенциалов ЭП, которые соответствуют параметрам, образующимся в орбитальных условиях эксплуатации КА.

В процессе подтверждения способности к детектированию электрических полей определен ряд задач, выполнение которых позволит судить о состоятельности изделия как микроминиатюрного вибрационного модулятора электрических полей (ВМЭП) для космических аппаратов любых классов.

Таковыми задачами и характеристиками, подтверждающими работоспособность изделия [2] в космических условиях, являются:

1) измерение напряженности электрического поля в диапазоне $0 \sim 250$ кВ/м;

2) стабильная работоспособность в условиях воздействия электрического поля в диапазоне $0 \sim 250$ кВ/м;

– отсутствие изменения резонансной частоты модулятора в условиях электрического поля в диапазоне $0 \sim 250$ кВ/м;

– отсутствие изменения потребляемой мощности в условиях воздействия электрического поля в диапазоне $0 \sim 250$ кВ/м, не более 30 мА;

3) определение метрологических характеристик вибрационного модулятора.

С целью установления работоспособности устройства макетный образец вибрационного модулятора помещался в экранированный корпус. В экранированном корпусе размещался источник электрических полей. Источником электрических полей является задающий электрод, изготовленный в виде медной пластинки и вынесенный внутрь экранированного корпуса на жестком проводнике (рис. 1).

Для проведения оценки детектирования изделием электрических полей был сформирован стенд, состоящий из аппаратуры подачи потенциала на задающий электрод, источника питания датчика и осциллографа. Схема стенда приведена на рис. 2.

В ходе проведения эксперимента макетный образец ВМЭП оказывался под воздействием электрического поля, созданного задающим электродом. На задающий электрод подавался потенциал с источника питания, диапазон выходного напряжения источника питания $0 \sim 630$ В. Задающий электрод располагался в 2,5 мм от конца чувствительного электрода. Путем пересчета на чувствительном электроде создавалась напряженность электрического поля в диапазоне $0 \sim 250$ кВ/м. Осциллограф подключался к чувствительному электроду, с которого производилось считывание выходного сигнала.

Шаг выходного напряжения на источнике питания составил 50 В, что эквивалентно 20 кВ/м на чувствительном электроде внутри экранирующего корпуса.

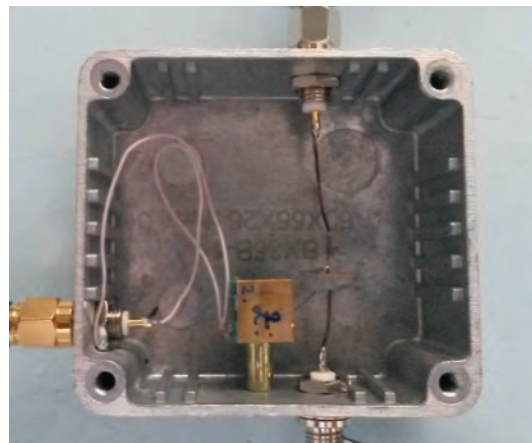
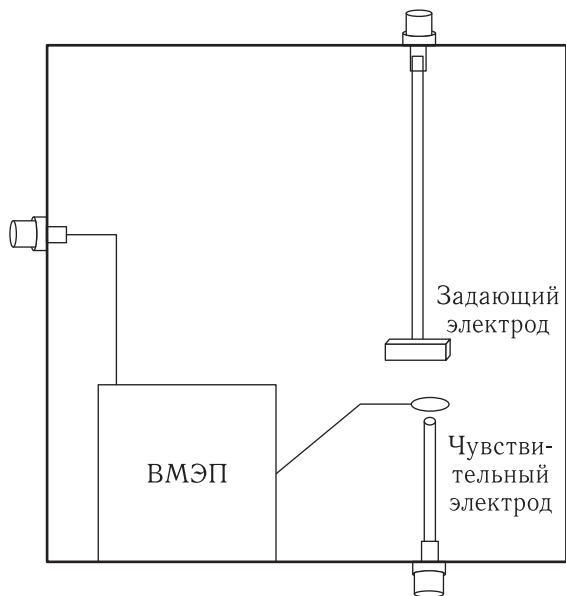


Рис. 1. Схема и фотография макетного образца в экранирующем корпусе

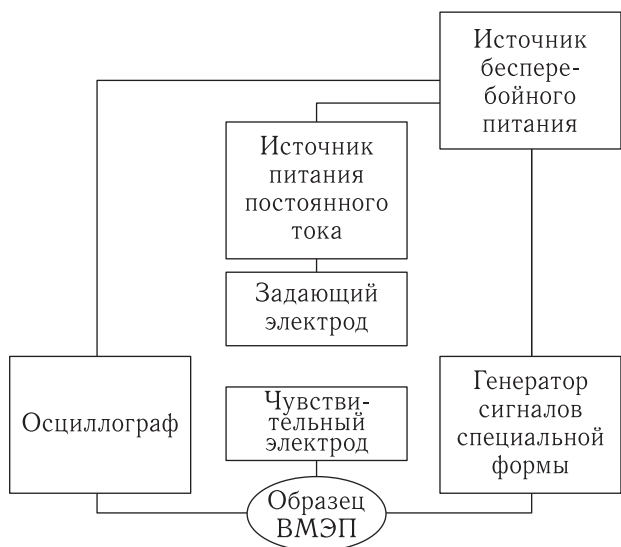


Рис. 2. Структурная схема экспериментального стенда

Результаты тестирования изделия представлены в табл. 1.

Результаты тестирования подтвердили способность датчика ЭП к детектированию электрических полей в заданном диапазоне. Воздействие электрического поля не сказалось на работоспособности устройства, т. е. отклонений от значений резонансной частоты, амплитуды колебаний экранирующего электрода и мощности потребления, полученных в нормальных условиях, выявлено не было.

Таблица 1. Результаты тестирования изделия

| № | Потенциал, поданный на задающий электрод, В | Напряженность электрического поля, созданная на чувствительном электроде, кВ/м | Выходной сигнал, полученный с ВМЭП, мВ |
|----|---|--|--|
| 1 | 0 | 0 | 4 |
| 2 | 50 | 20 | 8 |
| 3 | 100 | 40 | 12 |
| 4 | 150 | 60 | 16,5 |
| 5 | 200 | 80 | 21 |
| 6 | 250 | 100 | 26 |
| 7 | 300 | 120 | 31 |
| 8 | 350 | 140 | 36 |
| 9 | 400 | 160 | 40,5 |
| 10 | 450 | 180 | 46,5 |
| 11 | 500 | 200 | 51 |
| 12 | 550 | 220 | 56,5 |
| 13 | 600 | 240 | 61 |
| 14 | 630 | 252 | 63,5 |

Таблица 2. Значения выходного сигнала ВМЭП при напряженности поля 20 кВ/м

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8,097 | 8,198 | 8,193 | 8,201 | 8,148 | 8,107 | 8,154 | 8,119 | 8,133 | 8,049 |
| 8,136 | 8,167 | 8,082 | 8,134 | 8,072 | 8,321 | 8,095 | 8,021 | 8,129 | 8,05 |
| 8,061 | 8,067 | 8,095 | 8,102 | 8,076 | 8,121 | 8,095 | 8,127 | 8,143 | 8,121 |
| 8,103 | 8,088 | 8,374 | 8,282 | 8,139 | 8,297 | 8,112 | 8,059 | 8,126 | 8,19 |
| 8,112 | 8,071 | 8,085 | 8,116 | 8,063 | 8,168 | 8,09 | 8,162 | 8,131 | 8,167 |

Определены следующие метрологические характеристики ВМЭП [3].

Чувствительность ВМЭП определялась как отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к напряженности электрического поля, вызывающего его изменение:

$$S = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} \quad (1)$$

и на основе табл. 1 составила ~ 2,5 мВ/кВ/м.

Порог чувствительности ВМЭП — наименьшее значение напряженности электрического поля, которое вызывает появление сигнала. Этот параметр связан с зоной нечувствительности, т. е. с зоной, в пределах которой при наличии напряженности электрического поля на выходе ВМЭП сигнал отсутствует. Влияние на этот параметр оказывает погрешность измерения. Погрешность измерения определяет, при какой напряженности электрического поля можно с уверенностью говорить о ее детектировании.

Для определения погрешности измерения было произведено пятьдесят измерений величины напряженности электрического поля, равного 20 кВ/м, которые представлены в табл. 2. Табл. 2 содержит пятьдесят значений выходного сигнала ВМЭП, при этом каждое значение является усредненным значением ста измерений.

Среднее квадратичное отклонение при 50 измерениях определяется следующим выражением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} (x_i - x_{\text{ср}})^2}{50(50 - 1)}} = 0,0098.$$

Далее определим погрешность измерения, приняв доверительную вероятность равной 0,99

(значение коэффициента Стьюдента при 50 измерениях равно 2,7):

$$\theta_{\text{случ}} = 2,7 \cdot 0,017 = 0,026.$$

Таким образом, случайная погрешность измерения напряженности электрического поля составила ±0,026 мВ.

Для определения порога чувствительности с учетом погрешности измерения, при которой достоверность получения результата составляет 100 %, произведены подробные измерения на начальной части диапазона чувствительности напряженности электрического поля, показанные в табл. 3.

Таблица 3. Выходной сигнал ВМЭП под воздействием электрического поля 0–0,8 кВ/м

| Напряженность электрического поля на чувствительном электроде, кВ/м | Выходной сигнал, полученный с датчика, мВ |
|---|---|
| 0 | 0,903 |
| 0,08 | 0,923 |
| 0,16 | 0,931 |
| 0,24 | 0,937 |
| 0,32 | 0,953 |
| 0,4 | 0,961 |
| 0,48 | 0,973 |
| 0,56 | 0,981 |
| 0,64 | 0,992 |
| 0,72 | 1,022 |
| 0,8 | 1,025 |

В результате сопоставления погрешности измерения и значения измерений в табл. 3, был определен порог чувствительности ВМЭП напряженности электрического поля, который составил 0,16 кВ/м.

Инерционность ВМЭП — время, в течение которого выходная величина принимает значение, соответствующее входной величине. Для вибрационного модулятора эта величина определяется известным выражением $T = 1/f$ и при резонансной частоте 300 Гц будет составлять 3 мс.

На рис. 3 отображена статическая характеристика ВМЭП, отражающая зависимость выходного сигнала вибрационного модулятора от значения напряженности электрического поля.

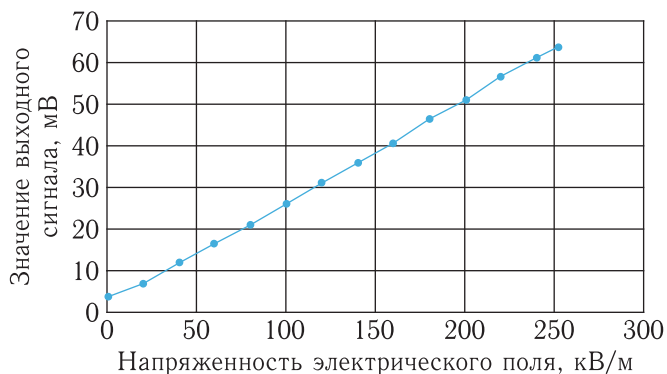


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала датчика от напряженности электрического поля

Исходя из графика зависимости выходного сигнала ВМЭП от напряженности электрического поля видно, что зависимость носит линейный характер.

По характеру получения сигнала от измеряемой величины ВМЭП классифицируется как *параметрический* измеритель, в котором изменение величины напряженности электрического поля вызывает изменение именно выходного сигнала.

По характеру зависимости выходного сигнала от входного ВМЭП классифицируется как *пропорциональный* измеритель, при котором сигнал

на выходе устройства измерения пропорционален напряженности электрического поля.

По типу действия разработанный ВМЭП соответствует измерительному изделию *прямого действия*, так как преобразуют внешнее воздействие непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление.

По области применения ВМЭП — *наружный* измеритель, так как он реагирует на внешние воздействия и сообщает системе контроля об изменениях в окружающих условиях среды.

Полученный набор характеристик позволяет определить потребительские параметры и классифицировать разработанное устройство. Определена возможность детектирования электростатических полей, эквивалентных полям геомагнитных возмущений на поверхности космического аппарата в необходимом диапазоне. Кроме того, полученные результаты исследований продемонстрировали возможность применения ВМЭП как полноценного устройства контроля электростатических полей, что позволит расширить сферу его применения и использовать в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. *Дорофеев Р. Ю., Жуков А. А.* Особенности защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от электростатического разряда на этапе ее схемотехнического проектирования. Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». 2–4 июня 2009 г. М.: Радиотехника, 2010. С. 140–149.
2. *Дорофеев Р. Ю., Смирнов И. П., Жуков А. А., Корпунин А. С.* Расчетно-экспериментальная оценка характеристик микробалки вибрационного преобразователя электрического поля // Нано- и микросистемная техника, 2015, № 10. С. 22–30.
3. *Аш Ж.* Датчики измерительных систем. Книга 1. М.: Мир, 1992. 480 с.